

尼日尔三角洲里奥-德雷盆地泥底辟变形与形成演化特征

余一欣^{1,2},王涛^{1,2},陈占坤³,苏玉山³,张纪新^{1,2},吴世祥³

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院,北京 102249; 3. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083]

摘要:尼日尔三角洲东北部的里奥-德雷盆地发育多条阿卡特组泥底辟构造带,对油气成藏产生了重要影响。根据泥岩隆升幅度及其与周围地层的接触关系,可将泥底辟划分为复杂形态刺穿型和简单形态隐伏型两类。平面上,泥底辟主要呈近SN向的条带状和圆点状展布,并影响上覆地层的发育,形成3类正断层。泥底辟主要经历了中渐新世之前的初始沉积-微弱活动期、晚渐新世-中新世的强烈隆升活动期以及上新世至今的微弱活动-整体埋藏期等3个形成演化阶段。泥底辟的发育除受到重力滑动作用及上覆地层的差异负载作用影响外,还受到盆地东南部大西洋转换断层及泥下基底断裂的影响。对里奥-德雷盆地泥底辟构造发育特征的研究,有助于分析泥底辟对圈闭、储层发育以及油气运移的影响。

关键词:阿卡特组;泥底辟;断层;里奥-德雷盆地;尼日尔三角洲

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Deformation and evolution of mud diapirs in Rio Del Rey Basin, Niger Delta

Yu Yixin^{1,2}, Wang Tao^{1,2}, Chen Zhankun³, Su Yushan³, Zhang Jixin^{1,2}, Wu Shixiang³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China]

Abstract: Several mud diapir belts developed in the Akata Formation mudstone are closely linked to the accumulation of hydrocarbon in the Rio Del Rey Basin, northeast Niger delta. According to their heights and contact relationships to peripheral strata, the mud diapirs can be divided into complicated pierced and simple buried styles, with S-N trending elongations or scattering dots in a plane view. Influenced by mud diapirs, three kinds of normal faults have developed in the overburden. The evolution of mud diapirs experienced three stages: the deposition and weak activity stage before the middle Oligocene, intense rising stage during the late Oligocene and Miocene, and weak activity and buried stage after the Miocene. In addition to the influence exerted by gravitational sliding and differential loading induced from the overburden, the formation of mud diapirs are also subjected to some Atlantic transform faults in the southeast part of the Rio Del Rey Basin and basement faulting activities. The study is helpful to the analysis of the impact of these diapirs upon the development of traps and reservoirs as well as hydrocarbon migration in the basin.

Key words: Akata Formation, mud diapir, fault, Rio Del Rey Basin, Niger Delta

尼日尔三角洲位于西非大陆边缘,处于洋壳与陆壳接合部位、泛非断裂与中非转换断层的三联点,是一个在被动陆缘裂谷之上叠加的新生界三角洲沉积盆地,也是世界上最大的海退型三角洲,油气资源极为丰富^[1-4]。尼日尔三角洲的形成和演化始于早白垩世晚期的阿尔比期,主要经历了早白垩世一晚白垩世桑顿

期(可能延伸至晚侏罗世)的裂谷期和晚白垩世康潘期以来的漂移期两个阶段^[5]。目前在尼日尔三角洲盆地内发现了752个油气田,可采储量超过 $1\,000\times 10^8$ bbl油当量^[6],勘探潜力较大。

里奥-德雷盆地(Rio Del Rey盆地,下文简称RDR盆地)位于尼日尔三角洲的东北部,严格来讲应是尼

收稿日期:2021-02-15;修订日期:2021-11-04。

第一作者简介:余一欣(1977—),男,博士、副教授,盆地分析和构造地质学。E-mail: yuxin0707@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05033-002,2016ZX05033-001);国家重点研发计划项目(2017YFC0603105)。

日尔三角洲盆地的一个次盆^[4,7],是尼日尔三角洲盆地位于喀麦隆境内的一部分,水深0~60 m,面积约2 500 km²(图1)。RDR盆地的构造演化及地层发育特征与尼日尔三角洲盆地基本一致,是古新世至现今以来一直持续发育的新生代三角洲盆地,自下而上发育阿卡塔(Akata)组泥岩、阿格巴达组(Agabada)组砂泥岩和贝宁(Benin)组砂岩。这些地层均为穿时地层单元,发育时代为古新世至今^[7-8]。尼日尔三角洲盆地最显著的构造变形特征就是受阿卡塔组泥岩塑性流动影响,形成了丰富的重力滑动构造和泥底辟构造,并具有明显的构造分带性,对沉积体系的发育和油气聚集成藏也产生了重要影响^[1-4,9-14]。但目前有关RDR盆地泥底辟发育特征的研究文献较少,前人仅依据地震资料简单分析了该地区的泥底辟构造类型和构造分区特征,探讨了泥底辟构造相关的圈闭发育模式^[7,15]。本文主要是在前人研究的基础上,通过对最新三维地震资料进行精细解释和编图,分析RDR盆地泥底辟及相关断层发育特征,探讨泥底辟形成和演化的过程及其主要控制因素,以期为圈闭评价和油气成藏分析提供科学依据。

1 泥底辟发育特征

地震资料清楚地表明RDR盆地阿卡塔组泥岩层发生了明显的塑性流动,并形成多个形态各异的泥底辟构造带。本文主要根据泥岩层隆升幅度及与周围地层的接触关系,将泥底辟划分为刺穿型和隐伏型两类(图2)。刺穿型泥底辟隆升幅度高,并分割了上覆的

阿格巴达组和贝宁组。与刺穿型泥底辟相邻的上覆周缘地层则发生掀斜,并表现出明显的不协调变形特征(图3)。另外,刺穿型泥底辟顶部多呈不规则形态,局部地区发生塌陷而形成小洼陷,同时还发育多条规模较小的正断层(图3)。隐伏型泥底辟构造多表现为简单的枕状形态,泥岩隆升幅度小,而且未刺穿上覆地层,两者表现出协调变形特征(图2)。

受阿卡塔组泥岩层塑性流动变形影响,被泥岩层分割的上覆地层和下伏地层的变形特征存在明显差异。泥下地层的地震反射质量相对较差,但总体以正断层和轻微的隆凹形态为主。泥上地层则受泥底辟变形影响明显,在泥底辟构造之间发育微盆(minibasin)和龟背构造(图2,图3)。除泥底辟顶部断层外,大部分断层都在泥岩层顶部发生滑脱。整体来看,RDR盆地的构造变形具有分带特征,从NE至SW方向,依次发育伸展滑脱构造带、刺穿泥底辟构造带和逆冲构造带(图2)。

平面上,较厚的泥岩层和泥底辟构造带主要分布在盆地中部地区,表现为条带状和圆点状(图4)。盆地西部地区发育3个呈圆点状分布的刺穿型泥底辟构造,单个面积都小于10 km²(表1)。中东部地区发育5条近SN向展布的刺穿型泥底辟构造带,整体呈北窄南宽的形态,局部有细颈化特征,分布面积较大,最大可达75 km²,隆升幅度最大可超过4 km(图3,图4;表1)。

2 相关断层发育特征

受阿卡塔组泥岩流动及变形影响,RDR盆地发育

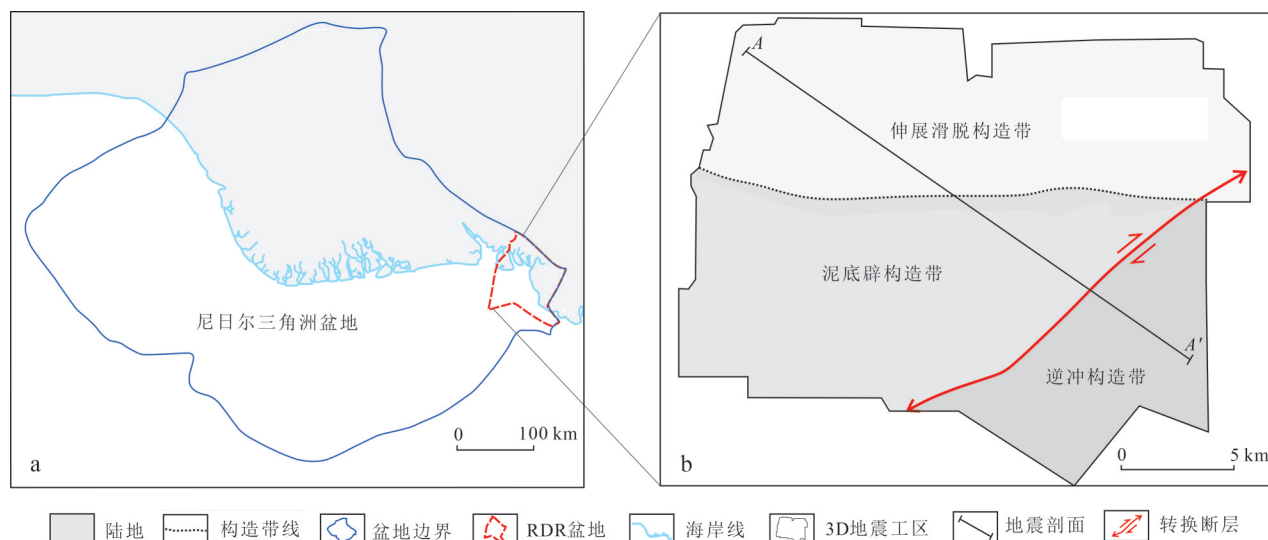


图1 尼日尔三角洲RDR盆地区域地质特征

Fig. 1 Regional geology of the RDR Basin, Niger Delta

a. 尼日尔三角洲盆地位置;b. RDR盆地构造区带划分

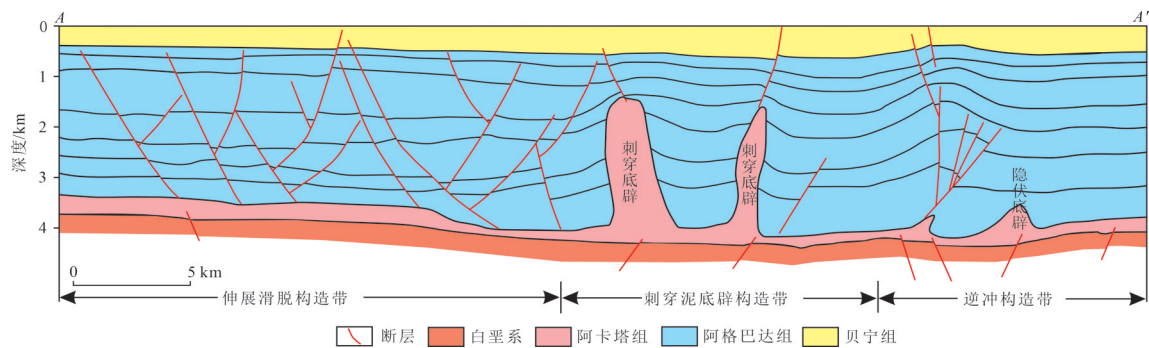


图2 RDR盆地NW-SW向地质剖面(剖面位置见图1b)
Fig. 2 Geological section of the RDR Basin (See Fig. 1b for its location)

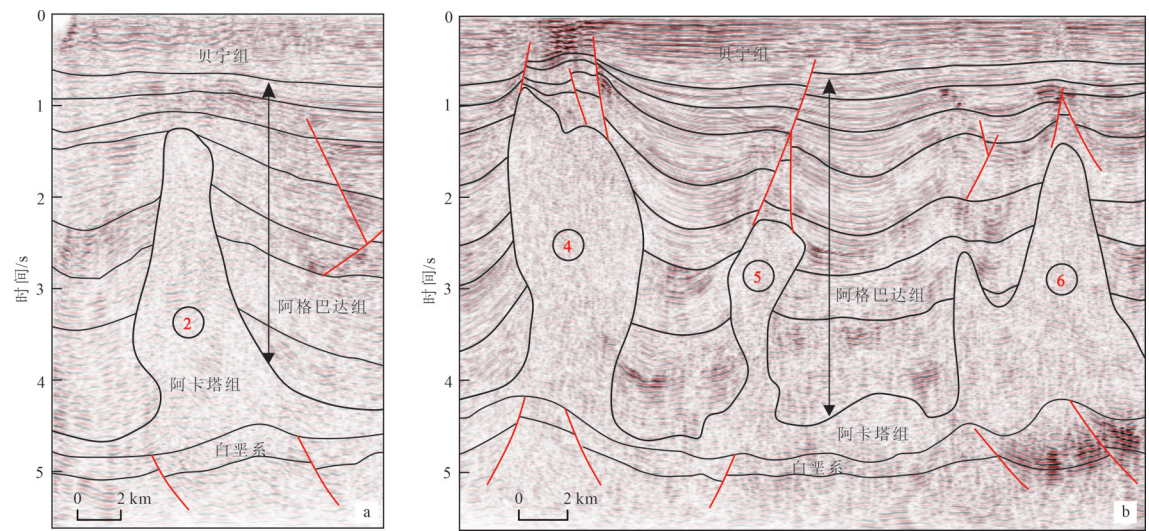


图3 RDR盆地刺穿型泥底辟发育特征(泥底辟编号位置见图4)
Fig. 3 Characteristics of pierced mud diapirs in the RDR Basin (See Fig. 4 for the locations of the numbered mud diapirs)
a. ②号泥底辟剖面特征;b. ④,⑤和⑥号泥底辟剖面特征

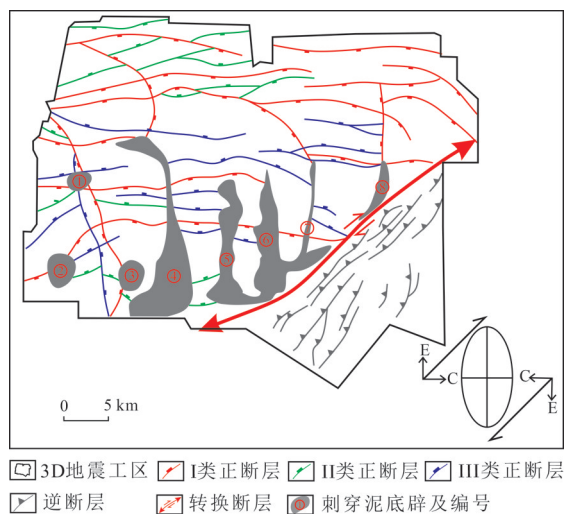


图4 RDR盆地刺穿型泥底辟构造带和主要断裂分布(刺穿泥底辟分布据文献[8, 14]修改)
Fig. 4 Distribution of pierced mud diapirs and main faults in the RDR Basin(modified after references 8 and 14)
E. 伸展;C. 挤压

表1 RDR盆地刺穿型泥底辟构造带基本特征
Table 1 Main characteristics of pierced mud diapirs in the RDR Basin

构造带 编号	隆升高度/ km	分布面积/ km ²	展布形态	展布方向
①	3.2	4.7	圆点状	—
②	3.4	9.3	圆点状	—
③	3.3	8.5	圆点状	—
④	4.1	75.0	条带状	NS
⑤	3.4	31.2	条带状	NS
⑥	3.9	43.6	条带状	NS
⑦	3.2	16.8	条带状	NNE-SSW
⑧	3.3	12.0	条带状	NNE-SSW

不同类型及活动期次的断层,其中以正断层为主。根据正断层活动特征及其切割层位,可以划分出3类正断层(图4)。I类正断层是长期活动断层,几乎断开了阿卡特组泥岩之上的所有地层,向下在泥岩层顶面发生滑脱,如图2伸展滑脱构造带内的大型断层。该

类断层的形成主要与斜坡背景下的重力滑动作用有关,所以呈近EW向展布,向南倾斜,平面延伸较长,在全区几乎都有发育(图4中的红色断层)。Ⅱ类正断层开始活动时间比Ⅰ类断层晚,多发育在Ⅰ类正断层上盘,以北倾为主,主要分布于盆地北部地区,少量分布在泥底辟周缘(图4中的绿色断层)。Ⅲ类正断层主要发育在泥底辟构造的周缘部位,呈放射状展布,规模较小,其形成主要与底辟作用有关,活动时期较晚(图4中的蓝色断层)。

逆断层主要发育在RDR盆地东南部的逆冲构造带内,形成多排近于平行的逆冲断裂带(图4)。逆断层平面延伸距离较短,向NW方向倾斜,断距较小,底部多发育隐伏型泥枕构造,其形成与基底倾斜及泥岩的塑性流动有关(图2)。

3 泥底辟发育过程及主控因素

借鉴盐构造平衡剖面复原方法^[16-17],同时结合RDR盆地泥底辟周缘地层的沉积形式及厚度变化特征,将RDR盆地泥底辟构造形成演化过程划分为初始沉积-微弱活动期、强烈隆升活动期和微弱活动-整体埋藏期等3个阶段。在阿卡塔组泥岩沉积时,受基底斜坡影响,斜坡上倾方向泥岩层厚度较下倾方向为薄(图5a)。中渐新世之前,受重力作用和较薄上覆层的差异负载作用影响,泥岩开始向下倾方向(大西洋方向)发生轻微的塑性流动,在盆地北部沿泥岩层顶面开

始形成少量滑脱断层(Ⅰ类断层),泥底辟之间的微盆也随之开始发育。晚渐新世-中新世是泥岩塑性流动和泥底辟强烈活动期(图5b),斜坡上倾方向区同沉积滑脱断层更加发育,同时造成上、下盘重力差异,诱发下盘泥岩层触发底辟上拱作用,并导致下盘局部地区泥岩增厚。斜坡中部发育复活泥底辟,顶部发育多条断层(Ⅲ类断层),形成小型地堑。下倾方向区的被动泥底辟隆升速率较快,接近出露海底,并分割了两侧的沉积体系(图5b)。上新世至今,泥底辟仅发生了比较轻微的隆升,整体进入埋藏阶段。泥岩的流动在同沉积断层下盘形成小型的三角形泥滚构造,局部地区还发育焊接构造和龟背构造。泥底辟顶部形成一些新的小型正断层(Ⅲ类断层),上覆地层也发生了微弱的褶皱变形。前缘的被动泥底辟由于其隆升速率小于上覆地层的沉积速率,从而被上覆地层埋藏,未能分割沉积体系(图5c)。

根据RDR盆地规模较大的刺穿型泥底辟构造带平面展布特征(图4),可以推测该地区泥底辟的发育除受到大陆斜坡背景下常见的重力滑动作用以及上覆地层的差异负载作用影响外,应该还受到了其他因素的影响。如果仅仅是受这两类构造作用的控制,泥底辟构造带的展布方向应该与海岸线近于平行,如位于尼日尔三角洲盆地南部的下刚果盆地和宽扎盆地的盐底辟构造带的展布就表现出此类特征^[18-19]。结合区域地质背景分析,在RDR盆地的东南部有一条NE走向的大西洋转换断层延伸进入该盆地(图1,图4),该转

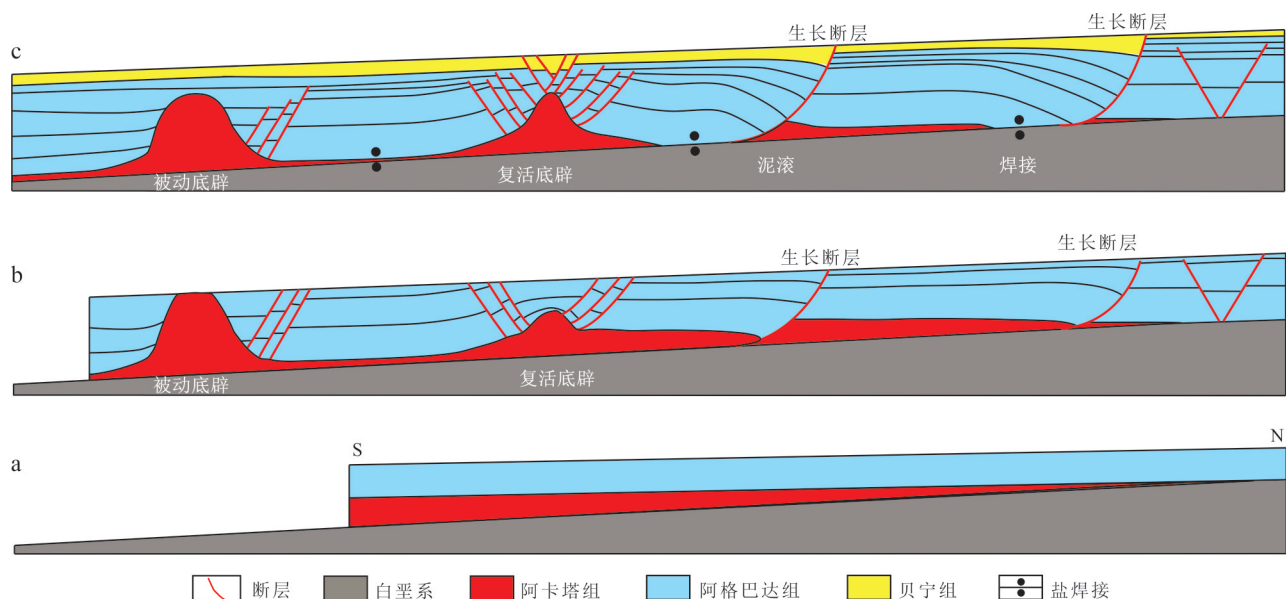


图5 RDR盆地泥底辟形成演化示意图

Fig. 5 Schematic map showing the evolution of mud diapirs in the RDR Basin, Niger Delta.

a. 阿卡塔组泥岩沉积期;b. 晚渐新世-中新世泥底辟强烈活动期;c. 上新世至今微弱活动-整体埋藏期

换断层的存在可能对泥底辟构造带的发育产生了重要影响。从平面分布来看,RDR盆地的刺穿型泥底辟构造带都局限发育于该转换断层的西北部(图4),这与渤海湾盆地莱州湾凹陷KL11-2盐底辟构造带的发育及其展布特征相似^[20]。这条NE向大西洋转换断层的右行走滑运动在断裂带附近地区可能形成近EW向的挤压应力场(图4),从而有利于泥岩上拱,形成近SN向展布的泥底辟构造带。另外,RDR盆地泥底辟的发育位置还可能与泥下地层内的基底断裂存在一定关系(图2)。基底断裂活动一般可在上覆地层中形成弱势区,从而有利于盐岩和泥岩等塑性地层侵入,进而形成各类盐(泥)底辟构造^[21-22]。反过来,该规律对地震反射质量较差的泥岩下伏地层的构造解释也应该有一定的指示意义。因此推断,RDR盆地泥底辟构造的发育是在大陆斜坡背景下,大西洋转换断层和泥下地层内基底断裂共同影响的结果。

目前的勘探成果显示,RDR盆地的油气田主要聚集在盆地中部泥底辟构造带周缘地区,这也表明泥底辟构造对油气聚集成藏有着重要影响。受泥底辟构造及其顶部断层发育的影响,主要储层阿格巴达组在泥底辟顶部常发育背斜、断背斜和断块圈闭,在泥底辟周缘还发育了岩性遮挡圈闭,为油气聚集提供了良好场所。另外,泥底辟侧翼及相关断层可作为良好的油气运移通道,有利于阿卡塔组烃源岩生成的油气向阿格巴达组储层运移^[7]。深入分析RDR盆地泥底辟构造发育特征及其对圈闭、储层发育和油气运移的影响,将对油气勘探起到重要的推动作用。

4 结论

1)尼日尔三角洲RDR盆地具有明显的构造分带性,自NW至SE方向依次发育伸展滑脱构造带、刺穿泥底辟构造带和逆冲构造带。盆地内主要发育刺穿型和隐伏型2类泥底辟构造,呈近SN向的条带状和圆点状展布。受泥底辟作用影响,主要发育3类正断层及逆断层。

2)RDR盆地泥底辟主要经历了中渐新世之前的初始沉积-微弱活动期、晚渐新世-中新世的强烈隆升活动期以及上新世至今的微弱活动-整体埋藏期等3个形成演化阶段。上新世以后,泥底辟构造带对上覆地层沉积体系并未起到分割作用。

3)除受到大陆斜坡背景下的重力滑动作用以及上覆地层的差异负载作用影响外,RDR盆地内泥底辟的发育还受到盆地东南部大西洋转换断层及泥下地层内

基底断裂的影响。

参 考 文 献

- [1] Haack R C, Sundararaman P, Diedjomahor J O, et al. Niger Delta petroleum system, Nigeria[C]//Mello M R, Katz B J. Petroleum systems of south Atlantic margins. Tulsa: AAPG, 2000: 213-232.
- [2] 张兴. 尼日尔三角洲盆地油气地质特征及潜力分析[J]. 石油学报, 2003, 21(1): 40-43.
Zhang Xing. Petroleum geological characteristics and potential analysis in the Niger delta basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 21(1): 40-43.
- [3] 侯高文, 刘和甫, 左胜杰. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 374-378.
Hou Gaowen, Liu Hefu, Zuo Shengjie. A study of distribution characteristics of petroleum in Niger delta basin and their controlling factors[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 374-378.
- [4] 邓荣敬, 邓运华, 于水, 等. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(6): 755-762.
Deng Rongjing, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2008, 35 (6): 755-762.
- [5] 韩文明, 邓运华, 于水, 等. 尼日尔三角洲深水勘探研究面临的挑战及其对策[J]. 地质学报, 2012, 86(4): 671-678.
Han Wenming, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Challenges faced with deep water exploration and research in Niger delta and its strategies[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(4): 671-678.
- [6] Mann P, Gahagan L, Gordon M. Tectonic setting of the world's giant oil fields[C]//Halbouty M, Horn M. Giant oil and gas fields of the decade 1990-2000. Tulsa: AAPG, 2003: 15-105.
- [7] 袁井菊, 丁一萍, 苏玉山, 等. 喀麦隆里奥-德雷盆地泥岩底辟构造与油气分布规律[J]. 石油实验地质, 2018, 40(4): 508-512.
Yuan Jingju, Ding Yiping, Su Yushan, et al. Mud shale diapir structure and hydrocarbon distribution in the Rio del Rey Basin of Cameroon[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 508-512.
- [8] Corredor F, Shaw J H, Bilotti F. Structural styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(6): 753-780.
- [9] Wiener M G, Mann M G, Molyneux J B, et al. Mobile shale in the Niger Delta: Characteristics, structure and evolution [M]//Wood L. Shale tectonics. Tulsa: AAPG, 2010: 145-161.
- [10] 谢昭涵, 孙永河, 闫玉民, 等. 尼日尔三角洲E背斜顶部断裂演化机制及封闭性[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 973-982.
Xie Zhaohan, Sun Yonghe, Yan Yumin, et al. Structural evolution mechanism and sealing of faults on the crest of anticline E in Niger Delta[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 973-982.

(下转第1474页)